

# 粉体包装过程中的智能静电监测系统

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2019.01.005

郑 傲<sup>1</sup> 刘 阳<sup>1</sup>  
鲁飞虎<sup>1</sup> 黎厚斌<sup>1</sup>  
许 忻<sup>2</sup> 王 静<sup>2</sup>

1. 武汉大学  
印刷与包装系  
湖北 武汉 430079  
2. 甘肃银光化学工业  
集团有限公司  
甘肃 白银 730000

**摘 要:** 在“工业 4.0”时代,为了提高生产水平与效率,制造业的智能监测与防护系统是必不可少的。其中,在粉体危险品物料的包装生产中,静电的监测与防护尤为重要。通过研究包装袋外部静电探测数值与包装内部实际静电电压的关系,提出了一套可以模拟粉体包装袋内外侧带电情况的假设模型,设计了一套非接触式隔物静电检测装置,并基于 LabVIEW 软件设计出了整套包装过程静电电压监测系统。经验证,该系统测试性能稳定,有望用于危险品粉体包装过程中的安全监测。

**关键词:** 智能包装; 静电监测; 粉体物料; 危险品

**中图分类号:** O441; TN06

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-7100(2019)01-0038-07

**引文格式:** 郑 傲, 刘 阳, 鲁飞虎, 等. 粉体包装过程中的智能静电监测系统 [J]. 包装学报, 2019, 11(1): 38-44.

## 0 引言

我国于 2015 年提出“中国制造 2025”战略,其主要思路为通过加快新一代信息技术与制造业的深度融合,积极推进生产制造智能化,加快生产结构转型<sup>[1]</sup>。其中安全生产是智能生产的前提条件,所以建立完善的智能监测与危险防护系统是智能生产中必不可少的一部分<sup>[2]</sup>。

粉体物料的包装生产在整个包装产业中占有较大的比重。目前,粉体物料大多采用填充法包装,而在粉体物料从料斗落入包装袋的过程中,物料不仅会彼此间摩擦也会与包装袋摩擦,从而产生并积累大量静电荷,形成危险的静电源,一旦发生静电放电有可能造成爆炸危害<sup>[3]</sup>。特别是对于危险品来说,静电放电会造成极其严重的后果。据报道,山东某化工厂于 2016 年 11 月发生爆炸。消防调查结果表明,该事故

是由于静电放电导致碱式氯化铝粉末发生爆炸。由此可见,静电的防护对粉体物料的安全生产具有重要意义。其中,粉料填充是包装过程中最危险的过程之一,对静电的监测极其必要<sup>[4]</sup>。

目前,尚未发现可以对填充中的粉体进行静电监测的方法,且考虑到实际包装过程中,监测装置要在包装袋外侧检测包装内部的静电带电情况,所以现实生产中需要一种隔物静电监测的仪器。本文针对粉体物料包装过程中产生静电的现象,设计了一套智能静电监测系统。

## 1 试验部分

### 1.1 试验原理

在实际包装过程中,为了保障安全生产,可使静电监测系统计算累计电荷的能量,并将其与该粉料的

收稿日期: 2018-11-12

基金项目: 中华人民共和国国家国防科技工业局基础产品创新计划专项基金资助项目,中央高校基本科研业务费专项(B类培育)资金资助项目(410500024)

作者简介: 郑 傲(1995-),男,河北廊坊人,武汉大学硕士生,主要研究方向为智能包装, E-mail: 545018582@qq.com

通信作者: 黎厚斌(1963-),男,湖北荆门人,武汉大学教授,博士生导师,主要从事绿色包装材料与智能包装方面的教学与研究, E-mail: lhb@whu.edu.cn

最小点火能进行比较<sup>[5]</sup>。若小于最小点火能则可以判定为安全;若大于或等于最小点火能,则表明静电可能会引起粉料爆炸,此时应立即停止生产,并进行静电消除处理。

由文献[6]可知,静电储存能量 $W$ 与静电电压 $U$ 相关,静电储存能量为

$$W = \frac{CU^2}{2},$$

式中 $C$ 为静电电容。

通常情况下,静电电压可用静电场强检测仪测得。然而,在粉体物料的填充过程中,由于包装袋静电阻隔作用等影响,系统无法准确获得包装袋内部的静电电压数值,从而会导致监测失准<sup>[7]</sup>。为了解决这一问题,在实验室中模拟粉体物料在包装袋中的下料过程,通过收集总结试验数据,计算出包装内部静电电压数值与静电场强检测仪数值的关系。

包装袋内外电场环境示意图如图1所示,其中 $E_0$ 为金属板电极产生的电场强度, $E$ 为经过包装袋静电阻隔后的实际场强。经过包装袋阻隔后的场强 $E$ 小于电极板场强 $E_0$ ,因此包装袋内外两侧的电势不相同。

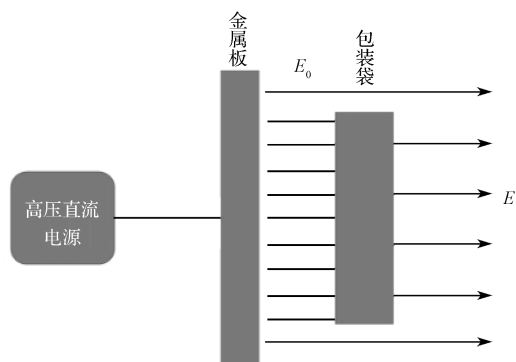


图1 包装袋内外电场环境示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electric field environment of the bag

图1中,高压直流电源用于提供静电电压,试验时连接金属板,使金属板产生近似平行的标准电场。该带电金属板模拟物料下落过程中产生的静电,再将包装袋样品贴到金属板上,模拟实际填充过程中包装袋及其电场环境<sup>[8]</sup>。由于包装袋与带电金属板贴合,所以包装袋内侧与带电金属板的电势基本相同。因为包装袋的静电阻隔等作用,导致包装袋外侧的电势与带电金属板电势不相同。包装袋外侧的带电情况,可以用非接触式静电场强检测仪探测<sup>[9]</sup>。

为了测定包装袋内侧的静电大小,课题组设计了图2所示的试验装置。其中:直流高压电源 HV-303P1 的输出端与 270 mm × 350 mm 的矩形金属板连接(金属板电极装置包括:绝缘紧固旋钮、绝缘垫块、绝缘支撑底座),该高压电源的电压可实现从 0~20 kV 的连续调节;1036E 静电探头(具有防爆功能)固定在标有刻度的滑轨上,其探测距离实现从 0~10 cm 连续调节;静电场强检测仪 MONROE 257D 将远距离接收到的静电场强信号通过 BNC (bayonet nut connector) 接头进行模拟输出。

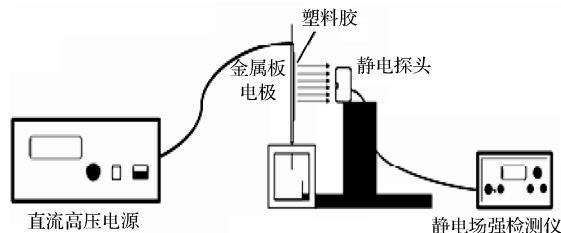


图2 试验装置示意图

Fig. 2 Simulation diagram of experimental equipment

## 1.2 试验样品

试验样品分别是厚度为 0.080 mm 的聚乙烯 (polyethylene, PE) 包装袋、厚度为 0.012 mm 的牛皮纸和厚度为 0.025 mm 的牛皮纸,样品形状均为边长 20 cm 的正方形。

## 1.3 试验方法

试验按以下步骤和方法进行。

### 1) 静电场强检测仪校准

打开直流高压电源,调节金属板电极输出电压为零;固定静电探头,调节静电场强检测仪的调零旋钮,使其显示数值为零,从而完成校准。

### 2) 包装袋外侧静电测试

将试验样品贴到金属电极板上,使其一侧与电极板接触。保证静电检测探头与金属板电极探测距离 1 cm 不变,调节直流高压电源依次为 0, 0.5, 1.0, ..., 10.0 kV,并依次记录静电场强测试仪得到的数据。在不同探测距离下试验,依次调节探测距离为 2, 3, ..., 10 cm,重复上述操作。

### 3) 数据分析

将直流电源输出电压与静电场强测试仪检测结果一一对应,对比分析其数量关系。其中将静电场强检测仪探测数值设为 $x$ ,直流电源电压设为 $y$ 。分析计算出不同探测距离下两者的数量关系式 $y=F(x)$ 。

### 4) 更换包装袋样品,重复上述操作。

## 2 试验结果与分析

在试验温度为 15.6 ℃, 相对湿度为 46% 的情况下, 图 3 为 PE 包装袋试样在测试距离分别为 1, 2, 3 cm 时, 电源输出电压数值与静电场强检测仪记录数值的关系。用同样的方法得到测试距离为 4, 5, …, 10 cm 时的关系图。

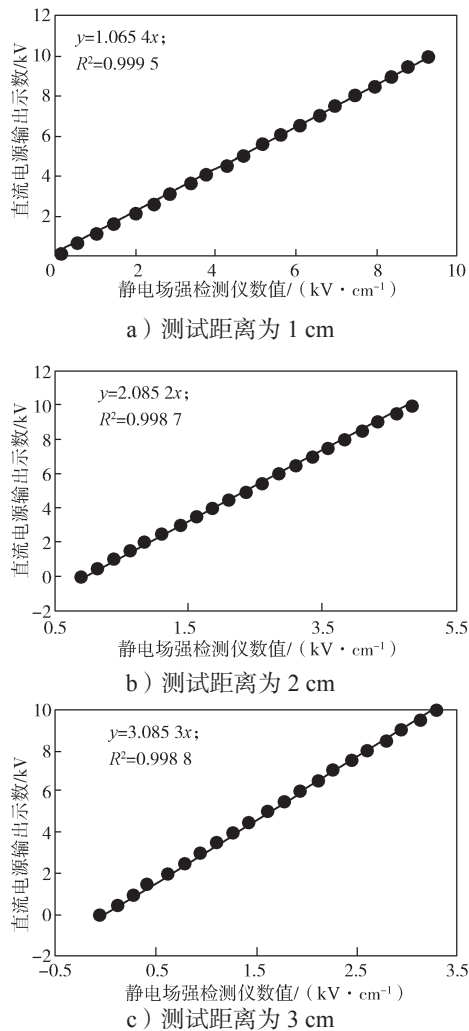


图 3 电源输出电压数值与静电场强检测仪数值关系图

Fig. 3 Relationship between power output voltage value and electrostatic detection

对试验数据分析后发现, 在一定测试距离下电源输出电压数值与静电场强检测仪数值之间具有极强的线性关系。这表明在产生静电的过程中, 包装袋内侧静电电压数值  $y$  与静电场强检测仪探测数值  $x$  之间满足关系

$$y = F(x) = kx,$$

式中, 参数  $k$  为常数, 定义为电源输出电压数值与静

电场强检测仪数值关系曲线的斜率。

图 3 表明测试距离的变化会使  $k$  值发生变化, 不同试验样品的  $k$  值随测试距离变化的情况如表 1 所示。

表 1 斜率  $k$  与测试距离  $d$  的对应关系

Table 1 The corresponding relation between slope  $k$  and measuring distance  $d$

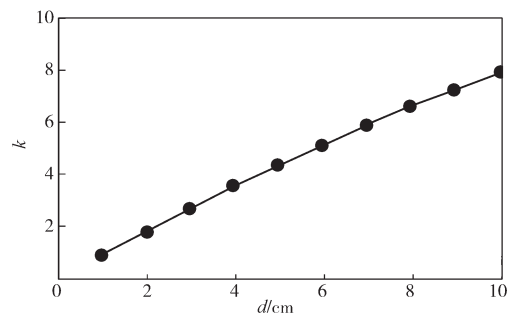
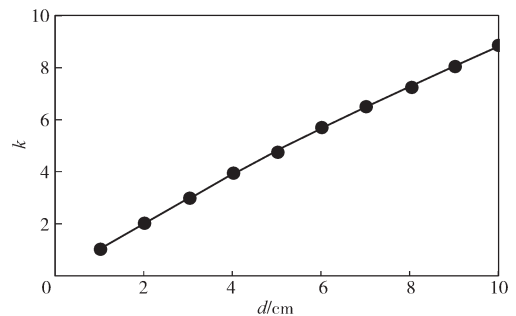
$d/\text{cm}$	$k$		
	0.080 mm 厚的 PE 包装袋	0.012 mm 厚的 牛皮纸	0.025 mm 厚的 牛皮纸
1	1.064 5	0.895 9	0.901 1
2	2.085 2	1.766 6	1.786 9
3	3.085 3	2.664 4	2.896 0
4	3.914 9	3.554 3	3.654 8
5	4.803 0	4.372 0	4.387 2
6	5.662 3	5.149 0	5.268 6
7	6.492 8	5.920 3	5.970 5
8	7.294 5	6.677 9	6.784 8
9	8.067 4	7.286 6	7.345 8
10	8.811 5	7.981 3	8.075 9

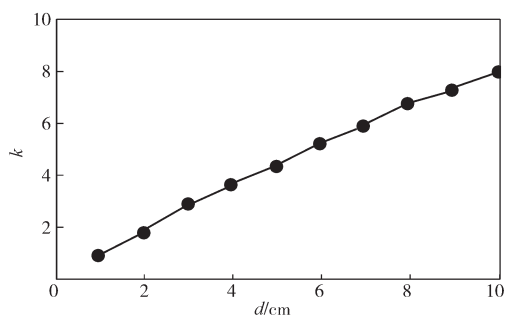
对表 1 中的数据进行处理, 可得到斜率  $k$  与测试距离  $d$  之间的关系为

$$k = ad^2 + bd + c, \quad (1)$$

式中  $a, b, c$  均为常数。

不同材料试验样品, 斜率  $k$  与测试距离  $d$  之间的关系如图 4 所示。





c) 0.025 mm 厚的牛皮纸

图 4 不同试验样品  $k$  与  $d$  之间的关系曲线

Fig. 4 The relationship between  $k$  and  $d$  in different test samples

试验样品为 0.080 mm 厚的 PE 包装袋时,  $k$  与  $d$  之间的函数关系式为

$$k = -0.0144d^2 + 1.0177d + 0.0745. \quad (2)$$

试验样品为 0.012 mm 厚的牛皮纸时,  $k$  与  $d$  之间的函数关系式为

$$k = -0.0170d^2 + 0.9767d - 0.0916. \quad (3)$$

试验样品为 0.025 mm 厚的牛皮纸时,  $k$  与  $d$  之间的函数关系式为

$$k = -0.0191d^2 + 1.003d - 0.0725. \quad (4)$$

由上述试验结果可知, 在测试距离不变的情况下, 包装袋内侧静电电压数值与静电场强检测仪数值间呈现线性关系。不同包装材料, 其线性关系斜率不同。测试距离的变化会导致线性关系的斜率发生改变, 其改变趋势呈现出规律性。因此, 静电电压设定值可根据试验探测数值推算出来。

### 3 静电检测系统

通过上述检测方法得到的测定值与设定值吻合程度高, 表明该方法可用于实际生产中。经过以上试验确定了关于  $k$  值的对应关系式, 但在实际运行时仍需要构建系统。

#### 3.1 静电检测系统的建立

智能静电电压检测系统主要分为静电数据模数转换与处理、静电测量数据采集、串口波特率修改<sup>[10]</sup>等几个部分, 如图 5 所示。该系统主要模块包括: 1036E 静电探头、257D 静电场强检测仪、模拟信号数据采集处理模块、输出显示模块等。基于 LabVIEW 虚拟仪器控制系统软件, 配合相应的硬件基础, 开发出静电电压在线检测系统<sup>[11]</sup>。该系统运行时, 257D 静电场强监测器收集 1036E 探头测得的

数据, 再将数值信息通过 PLC 模拟信号处理模块转换后, 输入至计算机组态软件, 通过输入检测距离和选择包装材料对应的  $k$  值关系式, 计算得出粉体物料填充过程中包装内侧静电电压<sup>[12]</sup>。

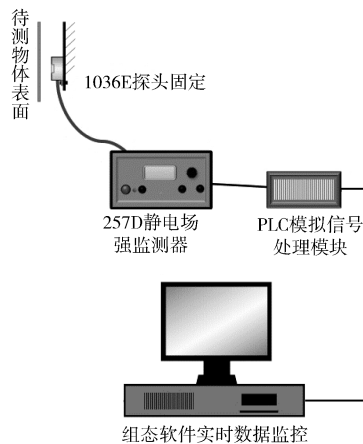


图 5 静电电压检测系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of electrostatic voltage monitoring system

智能静电电压检测系统的程序运行流程如图 6 所示。程序运行时, 系统通过数据采集模板完成数据的采集, 静电探头与包装袋间的探测距离作为试验参数预定值输入程序, 选择测试包装材料对应的函数  $F(x)$ <sup>[13]</sup>。导入数据后, 经过函数运算得出包装袋内侧真实静电电压。将计算得到的该数值与安全静电电压比较, 如若超出安全范围, 系统发出报警信号<sup>[14]</sup>。

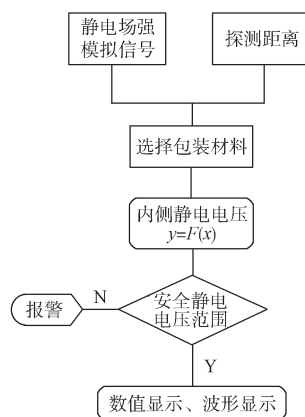


图 6 静电电压检测系统软件流程图

Fig. 6 Static monitoring system software flow chart

#### 3.2 静电电压检测系统的显示界面及控制

如图 7 所示, 静电电压检测系统控制显示主界面主要分为两个工作区域, 分别是静电电压实时波形显示和自定义设置窗口。



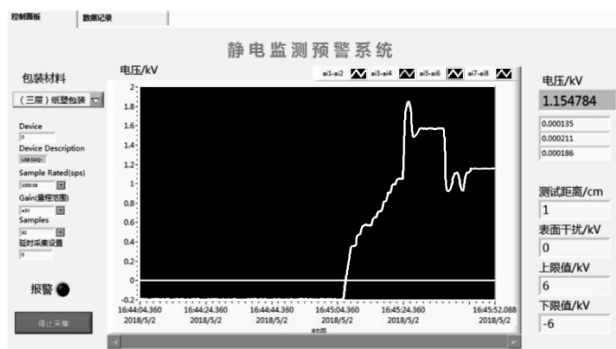


图7 静电电压检测系统软件主界面示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the main interface of the static monitoring system software

### 3.2.1 静电电压实时波形曲线

图8为检测系统运行过程中,静电电压的显示情况。其中数值波形曲线的数值即为测得的包装袋内部静电电压数值。图中所显示的静电电压数值是上述实验中调节高压电源所得,经检验该数值与高压电源数值相吻合,准确度高。此外,该系统可接入多个监测传感器,实现多工位点实时监测。

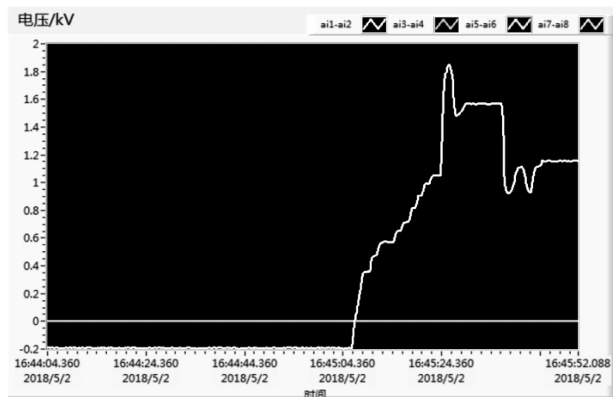


图8 静电电压数值波形曲线图

Fig. 8 Electrostatic voltage data waveform

### 3.2.2 自定义设置窗口

该静电电压检测系统具有可自定义的功能,图9为用户自定义设计窗口,该窗口的功能主要有以下几个方面:

1) 设置测试距离。由于实际测试的需要,测试距离并不是一成不变的,因此该软件具有测试距离设置功能。从理论上说,在一定范围内,静电探测探头与包装袋间的探测距离越小,监测过程中受外界的干扰越小,测得的数值越准确。但考虑到实际生产中的复杂情况,如探测设备与包装袋间距过近而引起的碰撞,或其他机构的空间限制等情况,故推荐探测距离

为2~6 cm。



图9 用户自定义设计窗口

Fig. 9 User-defined interface

2) 支持修改电压上下限阈值。由于物料间的静电安全电压有明显差异,所以系统运行时可设置相应的安全上下限阈值。此外该系统设置了报警灯和紧急报警声音提示。系统运行过程中,一旦有某个或多个监测点的静电电压超出所设置的安全值上下限,系统会自动报警<sup>[15-16]</sup>。一方面通知工作人员,另一方面系统自动作静电紧急消除处理,例如停止生产、启动喷淋加湿等<sup>[17-18]</sup>。

3) 选择包装材料。由上述试验结论可知,不同的包装材料对应不同的 $k$ 值函数,所以在使用过程中,需要选择包装材料所对应的函数关系式。图10为包装材料复选框。

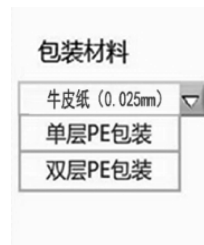


图10 包装材料复选框

Fig. 10 Packaging material mode checkbox

## 4 结语

本文针对粉体物料在包装过程中落料时的带电情况设计了一套静电检测系统。该系统解决了隔物静电检测不准确的问题,并结合硬件形成了一套较为完整的粉体物料包装过程中静电在线检测系统。该系统包括数据采集、数据分析、状态监测、静电安全警报、多数据显示以及历史数据查询等功能。实现了自动化操作和信息化远程监控,为粉体物料的高效生产提供了可靠的技术支撑。

### 参考文献:

[1] 李光,韩茵.“工业4.0”视阈下智能包装装备发

- 展趋势[J]. 包装学报, 2018, 10(1): 34-41.
- LI Guang, HAN Rui. Development Trend of Intelligent Packaging Equipment from the Perspective of "Industry 4.0" [J]. Journal of Packaging, 2018, 10(1): 34-41.
- [2] 房殿军. 智能制造框架下的智能物流系统建设[N]. 现代物流报, 2018-07-16(A07).
- FANG Dianjun. The Construction of Intelligent Logistics System Under the Intelligent Manufacturing Framework[N]. Modern Logistics News, 2018-07-16 (A07).
- [3] 王兴库, 张静辉. 浅谈静电产生的危害与预防[J]. 民营科技, 2007(9): 8.
- WANG Xingku, ZHANG Jinghui. The Harm and Prevention of Static Electricity Generation and Prevention[J]. Private Technology, 2007(9): 8.
- [4] 曹欣茂. 炸药静电危险的研究[J]. 火炸药, 1993(3): 33-35, 21.
- CAO Xinmao. Research on the Electrostatic Hazard of Explosives [J]. Explosive, 1993(3): 33-35, 21.
- [5] 卫水爱. 粉体输送、储存过程中静电安全监测技术研究[J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(增刊2): 96-98.
- WEI Shuai. Study Electrostatic Safety Monitoring Technique for Powder Transporting and Storage Process[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2009, 29(S2): 96-98.
- [6] GREASON W D. Review of the Effect of Electrostatic Discharge and Protection Techniques for Electronic Systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1987, 23(2): 205-216.
- [7] 董朝阳, 郭茂林, 李国峰, 等. 发射药制造中的静电在线检测及消除[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(5): 27-30.
- DONG Zhaoyang, GUO Maolin, LI Guofeng, et al. The Online Detection and Elimination of Static Electricity in the Manufacture of Propellants[J]. Journal of Weaponry and Equipment Engineering, 2017, 38(5): 27-30.
- [8] 范立思, 魏光辉, 谭志良. 防静电阻隔材料静电衰减性能测试方法[J]. 包装工程, 2000, 21(3): 43-45.
- FAN Lisi, WEI Guanghui, TAN Zhiliang. The Study on Electrostatic Decay Measurement Method and Application[J]. Packaging Engineering, 2000, 21(3): 43-45.
- [9] 魏 明, 叶 伟, 魏光辉. 非接触式静电电压表校验研究[J]. 仪表技术与传感器, 2002(12): 46-48.
- WEI Ming, YE Wei, WEI Guanghui. Study on Verification of Non-Contact Electrostatic Voltmeter[J]. Instrument Technique and Sensor, 2002(12): 46-48.
- [10] 周 华. 基于 LabVIEW 可视化数据采集处理系统探讨[J]. 现代商贸工业, 2010(1): 298-299.
- ZHOU Hua. Discussion on Visual Data Acquisition and Processing System Based on LabVIEW[J]. Modern Business Trade Industry, 2010(1): 298-299.
- [11] 姚 丽, 刘东东. 基于 LabVIEW 的数据采集与信号处理系统设计[J]. 电子科技, 2012, 25(5): 79-81.
- YAO Li, LIU Dongdong. Design of the Data Acquisition and Signal Processing System Based on LabVIEW[J]. Electronic Science and Technology, 2012, 25(5): 79-81.
- [12] 曾 倩, 袁海文, 陆家榆, 等. 基于无线传感器网络的特高压直流输电线路合成电场智能监测系统研究[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 10-15.
- ZENG Qian, YUAN Haiwen, LU Jiayu, et al. Intelligent Monitoring System of Total Electric Field Under UHVDC Transmission Line Based on Wireless Sensor Network[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 10-15.
- [13] 渠长威, 朱性福, 蒋海洋. LabVIEW 设备监测与故障预警[J]. 数字技术与应用, 2017(1): 59, 61.
- QU Changwei, ZHU Xingfu, JIANG Haiyang. LabVIEW Equipment Monitoring and Fault Warning[J]. Digital Technology and Application, 2017(1): 59, 61.
- [14] 雷玉常, 董仕荣, 刘一兵, 等. 油品储运场所在线静电检测仪设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2012(1): 100-101.
- LEI Yuchang, DONG Shirong, LIU Yibing, et al. Design of Online Electrostatic Detector for Oil Storage and Transportation[J]. Automation and Instrumentation, 2012(1): 100-101.
- [15] 张守华, 黎 智, 刘兴海, 等. 火炸药包装工艺中的防静电研究进展[J]. 包装工程, 2014, 35(13): 155-160.
- ZHANG Shouhua, LI Zhi, LIU Xinghai, et al. Research Progress on Electrostatic Protection in the Packaging of Explosive[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(13): 155-160.
- [16] 张 波, 徐凯华. 人工智能监控预警系统在烟草仓库中的应用[J]. 信息与电脑, 2018(1): 84-85, 88.
- ZHANG Bo, XU Kaihua. Application of Artificial Intelligence Monitoring and Prewarning System in Tobacco Warehouse[J]. China Computer & Communication, 2018(1): 84-85, 88.
- [17] KESHAVARZ M H. Theoretical Prediction of Electric Spark Sensitivity of Nitroaromatic Energetic Compounds Based on Molecular Structure[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 153(1/2): 201-206.
- [18] 夏 天, 雷 鸣, 郑 欣, 等. 智能变电站电能计量

装置在线监测系统设计[J]. 仪表技术, 2018(5): 18–21.

XIA Tian, LEI Ming, ZHENG Xin, et al. Design of Online Monitoring System for Electric Energy Metering

Devices in Intelligent Transformer Substation[J]. Instrumentation Technology, 2018(5): 18–21.

( 责任编辑: 邓光辉 )

## Intelligent Electrostatic Monitoring System in Powder Packaging Process

ZHENG Ao<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>1</sup>, LU Feihu<sup>1</sup>, LI Houbin<sup>1</sup>, XU Xi<sup>2</sup>, WANG Jing<sup>2</sup>

( 1. School of Printing and Packaging, Wuhan University, Wuhan 430079, China;  
2. Gansu Yinguang Chemical Industry Group Co., Ltd., Baiyin Gansu 730000, China )

**Abstract:** In order to improve production level and efficiency in the era of “Industry 4.0”, the intelligent monitoring and protection system in manufacturing industry is essential. In the packing process of the hazardous powder materials, the protection of static electricity is of great significance. By researching on the numerical relationship between measuring the electrostatic voltage on the outer surface of packaging and the actual electrostatic voltage inside the package, a set of hypothetical model simulating the inside and outside electrification condition of the powder packaging bag was proposed, with a set of electrostatic monitoring model designed. Based on LabVIEW software, a complete set of static voltage detection for packaging process was designed. The test results showed that the system was stable in testing performance and could be used for safety monitoring in the process of hazardous powder material packing.

**Keywords:** intelligent packaging technology; electrostatic monitoring; powder material; hazardous material